第 37 卷第 12 期
2017 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.12
Jun.,2017

DOI: 10.5846/stxb201611182342
孙然好,王业宁,陈婷婷.人为热排放对城市热环境的影响研究展望.生态学报,2017,37(12):3991-3997.
Sun R H, Wang Y N, Chen T T.Impacts of anthropogenic heat emissions on urban thermal environment: a review.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):3991-3997.

人为热排放对城市热环境的影响研究展望

孙然好[1,*],王业宁[1],陈婷婷[1,2]
1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
2 中国科学技术大学生命科学学院,合肥 230000

摘要:全球范围的城市扩张和能源消耗,导致人为热在不同时间和空间尺度上影响地表热环境,人为热排放与城市热岛的关系受到广泛关注。通过国内外文献总结源清单法、数值模拟法和能量平衡方程等 3 种人为热估算方法的优缺点,评价人为热研究在城市、区域和全球尺度的主要进展和区别,归纳出现有研究在城市尺度多关注人为热的时间动态变化,区域和全球尺度研究则更关注人为热的空间差异,以及人为热对于全球变暖的贡献和人类的适应对策。从中发现人为热研究中存在的问题和不足,包括研究尺度和研究方法匹配性、研究结果的验证和比较、人为热排放与景观功能的联系、人为热排放强度和周期对气温的影响机制等。根据现存问题提出多学科集成、人为热与景观功能耦合、时空尺度选择、数据获取等 4 个方面的建议,有助于在理论和方法方面深化和拓展城市人为热研究。

关键词:人为热;能源消耗;热岛效应;全球变暖;城市化

Impacts of anthropogenic heat emissions on urban thermal environment: a review

SUN Ranhao[1,*], WANG Yening[1], CHEN Tingting[1,2]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230000, *China*

Abstract: The rapid economic development creates huge demands of urban expansion in most global cities. Along with the urbanization, the energy consumption has significantly increased in the recent decades. The resulting anthropogenic heat emission can lead to significant changes in the surface thermal environment on different temporal and spatial scales. We reviewed the related references, and concluded that three methods, including source inventory, mathematical modeling, and surface energy balance, have been used for evaluating anthropogenic heat emission. Current studies are mainly focused on the city, regional, and global scales. The studies conducted on the city scale are concentrated on the temporal dynamics of anthropogenic heat emission, whereas those conducted on the regional and global scales pay close attention to the spatial heterogeneity of anthropogenic heat emission. The regional and global research also focuses on the contribution of anthropogenic heat emission to the global warming and potential climate adaption strategies. After reviewing the related references, we concluded four categories of weak points in the current studies of anthropogenic heat emission. To better understand and quantify the impact of anthropogenic heat emission on the surface thermal environment, we suggest several improvements in the future studies. First, the research conclusions of anthropogenic heat emission depend on different evaluation methods, and they are not easy to evaluate and compare with each other. Although the statistical and mathematic models can assess the anthropogenic heat emission, the *in situ* monitoring and enormous data collection (Big Data) would

基金项目:国家自然科学基金项目(41471150)
收稿日期:2016-11-18; **修订日期**:2017-01-11
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: rhsun@ rcee.ac.cn

better supplement the quantification of anthropogenic heat emission. Second, the research conclusions on city scales cannot be compared with those on the regional and global scales. Selecting appropriate methods for evaluating anthropogenic heat emission should be based on specific temporal and spatial scales. Third, the impact of anthropogenic heat emission lacks connection with landscape ecology. The theories of landscape ecology, such as patch-corridor-matrix, provide useful implications to improve the research on anthropogenic heat emission. Last, the impact of the intensity and dynamics of anthropogenic heat emission on the urban thermal environment have not been quantified enough in the current studies. Thus, it is crucial to understand the anthropogenic heat emission in different scientific fields including ecology, environment science, and building technology.

Key Words: anthropogenic heat; energy consumption; urban heat island; global warming; urbanization

随着城市化的不断发展,生态系统和人居环境发生了显著改变,以城市热岛效应为代表的地表热环境变化受到广泛关注[1-3]。城市人为热强度主要和人类活动以及能源消耗有关,2035 年全球一次能源消费将增加 41%,尤其是中国和印度等发展中国家[4],这将大大增加人为热排放量。能源消耗的热排放对地表热环境产生了极大的影响,IPCC 第五次评估减缓报告中称"如果不采取明确行动,未来人为温室气体继续排放将导致全球变暖超过 4℃",其中 47%直接来自能源供应部门、30%来自工业、11%来自交通业、3%来自建筑业[5]。城市人为热是城市热环境的重要组成部分,人为热时空动态直接影响热岛效应的形成和维持。城市人为热的来源受制于城市化水平和人类生产生活方式,逐渐成为城市热环境管理的重要目标。通过合理的管理和控制人为热排放,如工业活动、生活方式、车辆出行等,一定程度上能够减缓城市热岛效应的强度和范围。研究城市人为热排放如何影响城市景观生态功能,可以完善地表热环境的形成和维持机制,在理论上更加准确的刻画"格局-过程-功能"的相互作用关系,在实践中更加针对性的为面向热环境改善和节能减排的城市生态空间优化提供科学依据。本文总结城市人为热研究的主要进展,尤其是计算方法和时空尺度等方面的特点和问题,同时分析现有研究的关注点和不足,并为后续研究提供参考。

1 国内外研究现状

国内外对城市人为热进行了大量研究,尤其是针对人为热的评估方法,并建立了不同精度的空间分布和时间演变清单。人为热的定量化有助于评价其对城市能量平衡的贡献,以及在不同尺度上的研究对比。本文首先总结人为热的评估方法以及优缺点,其次介绍人为热在城市能量平衡中的作用,评价人为热评估对热岛效应研究的意义,最后介绍人为热研究在不同尺度的差异性和存在的问题。

1.1 人为热影响的评估方法

如何评估人为热对城市热环境的影响,是准确定量其贡献的关键问题。目前在人为热评估方法方面,主要有 3 种方法:源清单法、数值模拟法、地表能量平衡方程法[6]。源清单法假设人类活动输入的热量以显热形式排入大气,使周边气温升高。点源的人为热分配到周边空间时通常参考人口、建筑、道路等空间数据,不考虑热量转换的滞后性和行政单元内部差异性。源清单法需要计算不同统计口径的能源消耗,主要包括工业能源消费、车辆排放、居民生活及人类自身新陈代谢等的热排放,数据主要包括人口、用电量、燃气量、车流量等。源清单法因受制于统计数据的时间和空间分辨率,估算的人为热排放数据精度较低,而且多用在城市尺度[7-9]。数值模拟法基本原理是根据外部约束条件,利用数值模型模拟热量传输的过程,根据能量转换系数计算室内热量过程和温度变化。数值模型利用能耗方程得出不同类型建筑的人为排热,更多的用于计算单栋建筑的人为热排放规律,一般需要较大的计算量,多应用建筑设计等小尺度研究。这类模型包括 DOE-2[10]、eQuest[11]、TRNSYS[12]、EnergyPlus[13]、CFD[14]等。数值模拟法通常需输入气象因素、建筑结构、建筑材料、能耗方式、室内人员活动等。此外,一些大范围的气象预报数值模式,如 WRF/UCM[15]等也可以获取人为热的估算数据,但是由于多是模型模拟的中间数据,空间精度较低。地表能量平衡方程法的基本原理是依据不同

分量对地表能量的贡献,根据能量守恒原理,在获取净辐射量、水平传导量、地下储热量等参数后,可以估算剩余的人为热分量,一般忽略能量损耗。城市地表-建筑物-大气系统产生复杂的热力差异性,导致了城区与郊区的热量平衡有显著差别。随着遥感技术的发展,辐射量等参数可以通过多种遥感影像进行定量反演,因此遥感影像得到较多应用,该方法多应用于区域和全球尺度,如区域尺度采用中等分辨率的 ASTER、Landsat TM、环境 1 号卫星影像等[16-18],全球尺度采用 DSMP/OLS[19-20]等。

1.2　人为热对城市能量平衡的影响

城市地表的能量平衡方程包括几个部分,如太阳净辐射输入、人为热输入、显热通量、潜热通量、储热通量等[21]。强烈的人类活动影响景观类型和格局,从而改变了地表能量平衡的各个组成部分,进而影响城市热环境[22-23]。将绿地和水体等景观改变为高大建筑,会改变地表净辐射的重新分配,其次还会改变景观的显热和潜热通量,从而影响地表能量平衡。比如,研究发现不透水面积增加会导致城区温度明显高于郊区[24-26],绿地覆盖率与地表温度之间存在着明显的负相关关系[27-28],大斑块绿地降温效应明显高于小斑块绿地[29-32],这证明了城市景观类型改变的热环境效应。另外一个方面,城市景观的结构特征对热环境也有明显影响[27,33-37],说明城市景观结构在一定程度上改变了热量传输的路径和数量。总体上,城市景观类型和格局的变化一般具有较为明显的时间和空间规律性,因此对于热环境影响的强度和范围也可以进行预测。

相对地,城市人为热排放由于受到人类活动的规律性影响,包括工业活动、建筑能耗、车辆排热、身体代谢等方面,既有自身的不确定性又存在一定的季节周期规律[38]。城市人为热排放会导致城市热环境背景的差异性,比如文教区、公园区、商业区、住宅区等,由于人类活动的规律性不一致,人为热在不同时刻和季节明显不同。这种城市热环境背景值可以看作热景观的基质,而不同景观类型的热力特性可以看作不同的热力斑块,景观的配置和结构影响了热力廊道的形成,因此符合景观生态学的"基质-斑块-廊道"理论。基于此基础,在进行城市景观热环境调节功能研究中,需要充分考虑气温调节功能的显热和潜热影响因素,以及气温调节功能的范围和强度的产生条件。比如,有研究在特定时间和地点发现景观降温效应并不明显,甚至在夏季夜晚等某些时段存在一定的增温效应[39],在对一些公园湿地的研究中也有类似发现[40]。已有研究也发现,景观的降温效应与周边建筑物比例、离市中心的距离有显著的相关性[27,41]。这些看似不统一、甚至矛盾的结论,更多的是由于不同研究中城市热环境背景值具有差异,而人为热排放是导致热环境背景差异则是最重要的因素之一。因此,在人为热研究中,既要研究直接人为热量输入改变地表能量平衡,又要重点关注人为热导致的热环境背景改变,以及由此带来的地表景观显热和潜热过程变化,从而准确的刻画地表热环境变化的格局与过程。

1.3　人为热影响在城市尺度的研究

城市按照不同社会经济功能集聚形成多样化的景观综合体,人类活动导致空间差异明显的热环境效应[42],揭示城市内部热环境差异比单纯研究城郊热岛梯度,更有助于推动城市热环境改善的理论研究和具体实践[43]。在城市尺度研究中,人口集聚和能源消耗使得人为热在地表能量输入中占有较大比例[44],人为热主要来自于建筑物能耗、汽车尾气废排热、工业生产排热、人体新陈代谢等[45-46]。研究表明,人为热对局地气温的升高起着近似线性的推动作用,人为热释放越强,这种推动作用越明显,北京和上海的案例表明两者相关系数在 0.7 以上[38]。城市内部由于人口密度、能源消耗、经济结构等具有差异性,形成不同的城市功能区,人类活动的周期性会显著影响城市热岛强度[43,47-48]。不同城市功能区由于具有不同的热容量、反照率、粗糙度等,导致显热和潜热过程的差异,从而也会影响地表热环境状况[42,44,49]。商业区等人类活动强烈的城市功能区能够明显制约绿地降温效应的扩散[16,50],功能区复杂性和连通性均影响地表温度的稳定性[51]。

城市尺度研究中人为热的时间动态多有体现,受到较大的关注。如人为热导致白天热岛强度升高 1.3 ℃(日本东京)和 0.9 ℃(日本大阪)[52],人为热导致费城冬季夜间热岛强度增加 2—3 ℃[8],人为热导致北京白天热岛强度升高 0.5 ℃,夜晚升高 1.0—3.0 ℃[44]。此外,城市机动车保有量是人为热排放的重要贡献因子[53]。大城市的交通拥堵导致的局地温度增加也受到关注,如针对单个车辆的研究表明,空调开启时对周边

热环境的增温幅度为 0.36—0.62 ℃[54]，而车流量较大位置的地表温度通常高约 1.5—3 ℃[55]。一般来讲，同一城市人为热的排放量有明显的季节和日变化，冬季太阳高度角低，日照时间短，净辐射量小，居民取暖消耗的能量多，所以人为热比净辐射多。夏季则相反。这种冬夏季节的差异又因区域气候条件而异。以上研究表明，目前城市尺度的人为热研究多采用源清单法，对于建筑区域也会利用数值模式法，但研究大多重点关注人为热昼夜或季节的动态变化特征，而对人为热和城市景观要素组成及空间格局异质性如何协同影响城市热环境的研究较少。此外，人为热与城市社会经济功能的关系也是值得研究的重要内容，将为城市热环境背景的确定提供重要参数。

1.4 人为热影响在区域和全球尺度的研究

从区域和全球尺度来看，人为热排放具有极其显著的空间异质性[19]。全球平均人为热释放通量仅约为 0.03 W/m^2[49,56-57]，相比较于辐射、对流、蒸散发、热储量等，人为热的绝对值占比很小[58]。但是，研究发现，不同区域的人为热强度差异明显，如美国、西欧、中国的排热强度分别为 0.39、0.68、0.28 W/m^2[56]。在中国人为热排放也具有典型的地域分布特征，华北、华东、华中和华南等经济发达地区明显高于周边地区，而西北地区相对较小[59]。此外，研究表明全球人为热排放可以影响大气运动，导致北半球中高纬度地区比其它地区升温明显[60]。人为热在不同季节也会有不同的贡献，能源消费导致的人为热是全球冬季温度升高的重要贡献因子[61]。

人类社会发展使得人口分布更加集中，能源需求也越来越强烈，研究也发现随着人类活动和能源消耗的增加，人为热对于全球气温的影响也在增强，中国人为热排放强度从 1978 年的 0.07 W/m^{2}增加到 2008 年的 0.28 W/m^2[59]，最近 10 年来中国化石能源贡献的温室气体已经超过了土地利用变化带来的温室气体增加量[62]，预计到 2030 年，中国城市能源消耗将占中国能源总量的 85%，这将极大的影响城市人为热的排放量[63]。全球人为热强度从 1965 年的 0.01 W/m^{2}增长到 2012 年的 0.03 W/m^2[19]，人为热排放强度的增加能够显著影响局地气候，甚至可以影响全球气候，据模型预测到 2030 年全球的人为热排放强度可达 0.3 W/m^2，2100 年人为热对全球气温的增温幅度可达 0.4—0.9 ℃，对全球变暖的贡献将超过 CO_2[57]。以上研究表明，区域和全球尺度的人为热研究近年来逐渐得到重视。人为热影响在区域和全球尺度的研究方法多采用遥感技术和大尺度气象模式等，研究对象也逐渐从全球平均人为热强度的评估发展到对于典型区域人为热贡献的定量化。

2 问题与展望

尽管现有研究对于人为热的强度、范围和动态等有较多论述，对于评估方法也有很多研究，但是概括来看还存在以下问题：

2.1 人为热研究尺度不一致影响结果推广

全球尺度和城市尺度研究的对象和目的不匹配，导致研究结果无法直接推广和对比。全球尺度研究表明，人为热对于气候变暖的贡献较低[58]，但是对于北半球冬季增温来说，能源消耗具有较大的贡献[61]，而在城市内部的研究表明人为热对于城市增温具有更加重要影响[44,52]。这种差异性结论主要与研究的定位有关系，将人为热贡献放在全球变化尺度还是城市温度变化尺度，对于人为热的贡献差异很大。此外，人为热贡献于平均温度升高还是温度变化幅度等不同研究目标，也会影响研究结论。

针对该问题，要基于人为热研究的时空尺度选择合适的研究方法。空间尺度决定了研究方法和数据选择，源清单法主要基于城市统计数据进行人为热估算，因此对于单个城市研究、多个城市对比均具有明显优势；数值模式法既可以针对单个建筑，也可以扩展到区域和全球尺度，但是需要的模型差异很大，参数也明显不同，需要权衡不同研究对象和模型；能量平衡方程法更多的侧重于遥感反演模型参数，对于区域和全球研究具有优势，而且随着遥感技术的进步具有很大的发展潜力。小尺度研究尽量选择数值模式等高精度方法，对于大尺度研究，可以选择部分典型区通过不同方法研究结果进行对比，确定误差范围和误差来源，从而更好的

对大尺度研究进行校正。此外,时间尺度也是影响人为热估算方法的重要依据,相较于源清单法,数值模型和能量平衡方程法则能够估算多时间尺度的人为热数据。针对不同方法估算人为热绝对值差异大的问题,后续研究应该发展人为热在不同时间和空间尺度下的相对评估指标,从而对比人为热的时间和空间动态变化。

2.2　人为热研究方法和数据来源的不一致影响研究精度

源清单法能够估算工业、建筑和人口等能耗数据,但对于车辆排热难以识别,而且无法区分显热和潜热通量;数值模拟法可以精确计算单栋建筑的排热及时间演变系数,受限于计算量,通常在小尺度上应用;大尺度气象模式则无法考虑人类活动和建筑结构等,评估结果分辨率较低;能量平衡方程法受遥感算法及数据分辨率限制,在城市复杂建筑环境下难以获取精细结果。因此,即便对于同一研究对象,由于研究方法的差异,得出的结果差别也很大[55,64]。

后续研究要完善人为热数据的收集和监测技术。现有多数研究基于遥感影像和统计数据,而基于观测的研究较少。下一步应该加强针对城市典型功能区,如文教区、公园区、住宅区、商业区等,进行长时间序列的人为热输入和输出监测,从而为数值模型和能量平衡方程提供参数校准。随着通讯和网络技术的发展,大数据在各个学科均有较多应用,如何基于大数据对城市人类活动以及人为热足迹进行估算,是一个值得探索的领域。

2.3　人为热研究缺乏与城市景观功能研究进行结合

城市人为热的形成依赖于地表能量平衡的不同部分,人为热作为其中一个变量,与其他变量之间的联系缺乏深入研究。人为热排放强度被证明对局地气温有线性推动作用[38],但是在人为热强度增大情况下,绿地和水体的显热和潜热通量也会增强[46],人为热增温效应和景观降温效应叠加形成一定的作用范式,这种作用范式的数学形式和景观格局影响值得深入研究。

耦合人为热排放与景观气温调节功能是深化城市热环境机理研究的关键。现有的城市人为热研究多关注方法和结论的对比,更多应用于气候气象、建筑设计等领域。景观生态学强调格局、功能和服务,气温调节功能的形成和维持依赖于人为热背景值的范围和强度。因此,将不同人为热背景下的景观功能进行定量监测和识别,是准确评价景观功能和服务的基础,有助于完善"格局-过程-功能"的景观生态学理论框架,也可以为城市景观规划、建筑设计提供科学依据。

2.4　人为热动态变化对城市热环境影响的机制缺乏深入研究

现有的城市热环境研究中,也会考虑不同热力背景的影响,但是多以地理位置、建筑密度、人口密度等进行表征。这种简单的替代指标无法反映人为热的时间动态特征,而人为热排放周期对于气温的影响非常重要。人为热排放具有昼夜和季节变化,甚至在工作日和非工作日也具有周期变化,城市热岛强度在许多研究中也发现具有时间动态特征[8,65],人为热动态变化对气温调节功能的强度和范围的影响缺乏系统研究。

集成多学科知识是系统理解人为热对城市环境影响的基础。城市人为热受到多因素的影响,比如能源消耗、局地气候、建筑结构等,选择系统全面的影响因子需要多学科的理解和交叉;此外,城市人为热也会影响局地气候背景,从而导致城市地表的显热和潜热变化,甚至影响局地风场、降水和污染物聚集等,因此,综合利用生态学、环境科学和建筑学等领域的基本原理和技术方法,对城市人为热进行理解和研究,有助于更加准确和合理的解释人为热排放对地表热环境的影响。

参考文献(References):

[1] Grimm N B, Foster D, Groffman P, Grove J M, Hopkinson C S, Nadelhoffer K J, Pataki D E, Peters D P. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. Frontiers in Ecology and the Environment, 2008, 6(5): 264-272.

[2] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.

[3] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 1-4.

[4] BP Company. BP energy outlook 2035. http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook-2035.html

[5] IPCC. Climate Change 2014 Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1-408.

[6] 王业宁, 孙然好, 陈利顶. 北京市区车辆热排放及其对小气候的影响. 生态学报, 2017, doi: 10.5846/stxb201509111878. (in Press)

[7] Sailor D J, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. Atmospheric Environment, 2004, 38(17): 2737-2748.

[8] Fan H L, Sailor D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes. Atmospheric Environment, 2005, 39(1): 73-84.

[9] 占俊杰, 丹利. 广州地区人为热释放的日变化和年际变化估算. 气候与环境研究, 2014, 19(6): 726-734.

[10] Dhakal S, Hanaki K. Improvement of urban thermal environment by managing heat discharge sources and surface modification in Tokyo. Energy and Buildings, 2002, 34(1): 13-23.

[11] Heiple S, Sailor D J. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. Energy and Buildings, 2008, 40(8): 1426-1436.

[12] Assimakopoulos M N, Mihalakakou G, Flocas H A. Simulating the thermal behaviour of a building during summer period in the urban environment. Renewable Energy, 2007, 32(11): 1805-1816.

[13] Hsieh C M, Aramaki T, Hanaki K. Managing heat rejected from air conditioning systems to save energy and improve the microclimates of residential buildings. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35(5): 358-367.

[14] 刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析. 生态学报, 2012, 32(6): 1951-1959.

[15] 王志铭, 王雪梅. 广州人为热初步估算及敏感性分析. 气象科学, 2011, 31(4): 422-430.

[16] Kato S, Yamaguchi Y. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(1): 1-17.

[17] Wong M S, Yang J X, Nichol J, Weng Q H, Menenti M, Chan P W. Modeling of anthropogenic heat flux using HJ-1B Chinese small satellite image: a study of heterogeneous urbanized areas in Hong Kong. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1466-1470.

[18] 朱婷媛. 基于 Landsat 遥感影像的杭州城市人为热定量估算研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

[19] 陈兵, 陈良富, 董理, 石广玉. 人为热释放: 全球分布的估算及其气候效应的探索. 大气科学, 2016, 40(2): 289-295.

[20] Chen B, Shi G Y, Wang B, Zhao J Q, Tan S C. Estimation of the anthropogenic heat release distribution in China from 1992 to 2009. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(4): 507-515.

[21] 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 刘红年, 胡非, 李磊, 王咏薇, 王成刚. 城市气象与边界层数值模拟研究. 地球科学进展, 2010, 25(5): 463-473.

[22] Yang F, Lau S S Y, Qian F. Urban design to lower summertime outdoor temperatures: an empirical study on high-rise housing in Shanghai. Building and Environment, 2011, 46(3): 769-785.

[23] Liu Y, Shintaro G, Zhuang D F, Kuang W H. Urban surface heat fluxes infrared remote sensing inversion and their relationship with land use types. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4): 699-715.

[24] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, Bounoua L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 504-513.

[25] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. 生态学报, 2011, 31(14): 3890-3901.

[26] 刘珍环, 王仰麟, 彭建, 谢苗苗, 李猷. 基于不透水表面指数的城市地表覆被格局特征——以深圳市为例. 地理学报, 2011, 66(7): 961-971.

[27] Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4): 224-231.

[28] Papangelis G, Tombrou M, Dandou A, Kontos T. An urban "green planning" approach utilizing the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system. A case study of Athens, Greece. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1/2): 174-183.

[29] 曹丽琴, 张良培, 李平湘, 黄微. 城市下垫面覆盖类型变化对热岛效应影响的模拟研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, 33(12): 1229-1232.

[30] 陈辉, 古琳, 黎燕琼, 慕长龙. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系. 生态学报, 2009, 29(9): 4865-4874.

[31] Ma Y, Kuang Y Q, Huang N S. Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2): 110-118.

[32] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(1): 35-41.

[33] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. Landscape and Urban Planning, 2007, 80(4): 386-395.

[34] 徐丽华, 岳文泽. 城市公园景观的热环境效应. 生态学报, 2008, 28(4): 1702-1710.

[35] Li J X, Song C H, Cao L, Zhu F G, Meng X L, Wu J G. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3249-3263.

[36] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(1): 54-63.

[37] Hou P, Chen Y H, Qiao W, Cao G Z, Jiang W G, Li J. Near-surface air temperature retrieval from satellite images and influence by wetlands in urban region. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 111(1/2): 109-118.

[38] Niu Q, Nie C Q, Lin F, Li L, Ji L C. Model study of relationship between local temperature and artificial heat release. Science China Technological Sciences, 2012, 55(3): 821-830.

[39] Steeneveld G J, Koopmans S, Heusinkveld B G, Theeuwes N E. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 92-96.

[40] Sun R H, Chen A L, Chen L D, Lü Y H. Cooling effects of wetlands in an urban region: the case of Beijing. Ecological Indicators, 2012, 20: 57-64.

[41] Sun R H, Chen L D. How can urban water bodies be designed for climate adaptation?. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1/2): 27-33.

[42] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 何春阳. 上海城市热环境的空间格局分析. 地理科学, 2002, 22(3): 317-323.

[43] Buyantuyev A, Wu J G. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 17-33.

[44] 佟华, 刘辉志, 桑建国, 胡非. 城市人为热对北京热环境的影响. 气候与环境研究, 2004, 9(3): 409-421.

[45] 张弛, 束炯, 陈姗姗. 城市人为热排放分类研究及其对气温的影响. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 232-238.

[46] 王频, 孟庆林. 城市人为热及其影响城市热环境的研究综述. 建筑科学, 2013, 29(8): 99-106.

[47] Xiao R B, Weng Q H, Ouyang Z Y, Li W F, Schienke E W, Zhang Z M. Land surface temperature variation and major factors in Beijing, China. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(4): 451-461.

[48] Zhao X F, Jiang H, Wang H N, Zhao J J, Qiu Q Y, Tapper N, Hua L Z. Remotely sensed thermal pollution and its relationship with energy consumption and industry in a rapidly urbanizing Chinese city. Energy Policy, 2013, 57: 398-406.

[49] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. Atmospheric Environment, 1999, 33(24-25): 3897-3909.

[50] Hamada S, Tanaka T, Ohta T. Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(4): 426-434.

[51] Sun R H, Lü Y H, Chen L D, Yang L, Chen A L. Assessing the stability of annual temperatures for different urban functional zones. Building and Environment, 2013, 65: 90-98.

[52] Kikegawa Y, Tanaka A, Ohashi Y, Ihara T, Shigeta Y. Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese Major Cities, Tokyo and Osaka. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(1/2): 175-193.

[53] 王业宁, 孙然好, 陈利顶. 人为热计算方法的研究综述. 应用生态学报, 2016, 27(6): 2024-2030.

[54] 陈哲超. 单体汽车散热特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[55] Fujimoto A, Saida A, Fukuhara T. A new approach to modeling vehicle-induced heat and its thermal effects on road surface temperature. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(11): 1980-1993.

[56] Flanner M G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. Geophysical Research Letters, 2009, 36(2): L02801.

[57] 石广玉, 戴铁, 檀赛春, 申彦波, 王标, 赵剑琦. 全球年平均人为热释放气候强迫的估算. 气候变化研究进展, 2010, 6(2): 119-122.

[58] Zhao L, Lee X, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. Nature, 2014, 511(7508): 216-219.

[59] 陈兵, 石广玉, 戴铁, 申彦波, 王标, 杨溯, 赵剑琦. 中国区域人为热释放的气候强迫. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 717-722.

[60] Chen B, Dong L, Shi G Y, Li L J, Chen L F. Anthropogenic heat release: estimation of global distribution and possible climate effect. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2014, 92A: 157-165.

[61] Zhang G J, Cai M, Hu A X. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. Nature Climate Change, 2013, 3(5): 466-470.

[62] Li X X, Li W W, Middel A, Harlan S L, Brazel A J, Turner II B L. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: combined effects of land composition and configuration and cadastral-demographic-economic factors. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 233-243.

[63] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. Energy Policy, 2009, 37(11): 4208-4219.

[64] Allen L, Lindberg F, Grimmond C S B. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. International Journal of Climatology, 2011, 31(13): 1990-2005.

[65] 杨英宝, 江南. 近 50a 南京市气温和热岛效应变化特征. 气象科学, 2009, 29(1): 88-91.